



★ ★ ★ ★ ★
“十三五”

国家重点出版物出版规划项目



国之重器出版工程
网络强国建设

5G 丛书

5G Key Technologies and
Engineering Construction

5G 关键技术与工程建设

朱晨鸣 王强 李新 彭雄根 贝斐峰 王浩宇 编著

★ ★ ★ ★ ★
“十三五”

国家重点出版物出版规划项目

5G 丛书

5G 关键技术与工程建设

5G Key Technologies and
Engineering Construction

朱晨鸣 王强 李新 彭雄根 贝斐峰 王浩宇 编著



人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (CIP) 数据

5G关键技术与工程建设 / 朱晨鸣等编著. -- 北京 : 人民邮电出版社, 2019.11(2020.5重印)

(5G丛书)

国之重器出版工程

ISBN 978-7-115-51885-9

I. ①5… II. ①朱… III. ①无线电通信—移动通信—通信技术 IV. ①TN929.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第188934号

内 容 提 要

本书从5G的需求与愿景、5G研究项目与标准化进展等方面入手,介绍了5G的引入情境和现状,接着说明为达到5G需求所使用的无线传输新技术,以及为满足业务应用的弹性需求而设计的新的网络架构,并分析了5G可能的频谱资源,最后分析和探讨了5G网络规划和工程建设,同时展望了未来5G的应用发展前景。

本书的主要读者对象为科研院所、电信设备制造商、电信运营商、电信设备提供商、电信咨询业从业人员,以及关注通信行业技术发展的相关人士。

◆ 编 著 朱晨鸣 王 强 李 新 彭雄根 贝斐峰
王浩宇

责任编辑 杨 凌

责任印制 杨林杰

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路11号

邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

固安县铭成印刷有限公司印刷

◆ 开本: 720×1000 1/16

印张: 16.5

2019年11月第1版

字数: 306千字

2020年5月河北第2次印刷

定价: 88.00元

读者服务热线: (010)81055493 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315



朱晨鸣

研究员级高级工程师，中通服咨询设计研究院总工程师，全国优秀通信设计工作者，江苏省注册咨询专家，江苏省优秀工程勘察设计师，江苏省“333高层次人才培养工程”第三层次人才，南京市中青年拔尖人才。1996年7月毕业于南京邮电大学通信工程（无线通信）专业，长期从事无线通信网络技术及标准演进、无线网络规划和勘察设计工作，近年来参与撰写了《5G: 2020后的移动通信》等著作5本，获得20多项国际、国家及省部级优秀成果奖。



王强

研究员级高级工程师，中通服咨询设计研究院5G技术总监。2002年毕业于南京理工大学通信与信息系统专业，获工学博士学位。江苏省“333高层次人才培养工程”培养对象、江苏省“六大人才高峰”高层次人才、中国电信集团高级专家。长期从事移动通信前沿技术研究，专注于无线网络规划设计与优化。出版专著3本，发表论文20余篇，申请发明专利7项。



李新

中通服咨询设计研究院高级技术经理，高级工程师，2006年7月毕业于北京邮电大学，获工学博士学位。长期从事移动通信标准、技术及网络规划建设研究工作。近年来出版了移动通信相关图书3本，发表论文近20篇，申请发明专利5项，参与行业及地方标准编制5项。



彭雄根

中通服咨询设计研究院有限公司高级工程师，注册咨询工程师，2009年毕业于东南大学信息科学与工程学院，获工学硕士学位。主要研究方向为4G/5G移动通信关键技术与网络规划设计，在国内知名期刊发表论文近10篇，曾参加多项国家标准和行业标准的编制。



贝斐峰

中通服咨询设计研究院无线设计师，高级工程师。2008年毕业于浙江大学测试技术计量及仪器专业，获工学硕士学位。长期从事4G/5G方面的无线规划、设计、课题研究等工作，申请无线相关国家发明专利6项。



王浩宇

中通服咨询设计研究院工程师，2015年毕业于南京邮电大学通信工程专业，2016年毕业于香港科技大学电信专业并取得硕士学位，主要从事无线专业研究与设计工作。

《国之重器出版工程》 编辑委员会

编辑委员会主任：苗 圩

编辑委员会副主任：刘利华 辛国斌

编辑委员会委员：

冯长辉	梁志峰	高东升	姜子琨	许科敏
陈 因	郑立新	马向晖	高云虎	金 鑫
李 巍	高延敏	何 琼	刁石京	谢少锋
闻 库	韩 夏	赵志国	谢远生	赵永红
韩占武	刘 多	尹丽波	赵 波	卢 山
徐惠彬	赵长禄	周 玉	姚 郁	张 炜
聂 宏	付梦印	季仲华		



专家委员会委员（按姓氏笔画排列）：

- 于 全 中国工程院院士
- 王少萍 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 王建民 清华大学软件学院院长
- 王哲荣 中国工程院院士
- 王 越 中国科学院院士、中国工程院院士
- 尤肖虎 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 邓宗全 中国工程院院士
- 甘晓华 中国工程院院士
- 叶培建 中国科学院院士
- 朱英富 中国工程院院士
- 朵英贤 中国工程院院士
- 邬贺铨 中国工程院院士
- 刘大响 中国工程院院士
- 刘怡昕 中国工程院院士
- 刘韵洁 中国工程院院士
- 孙逢春 中国工程院院士
- 苏彦庆 “长江学者奖励计划”特聘教授



- 苏哲子 中国工程院院士
- 李伯虎 中国工程院院士
- 李应红 中国科学院院士
- 李新亚 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、
中国机械工业联合会副会长
- 杨德森 中国工程院院士
- 张宏科 北京交通大学下一代互联网互联设备国家
工程实验室主任
- 陆建勋 中国工程院院士
- 陆燕荪 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、原
机械工业部副部长
- 陈一坚 中国工程院院士
- 陈懋章 中国工程院院士
- 金东寒 中国工程院院士
- 周立伟 中国工程院院士
- 郑纬民 中国计算机学会原理事长
- 郑建华 中国科学院院士



- 屈贤明 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、工业和信息化部智能制造专家咨询委员会副主任
- 项昌乐 “长江学者奖励计划”特聘教授，中国科协书记处书记，北京理工大学党委副书记、副校长
- 柳百成 中国工程院院士
- 闻雪友 中国工程院院士
- 徐德民 中国工程院院士
- 唐长红 中国工程院院士
- 黄卫东 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 黄先祥 中国工程院院士
- 黄 维 中国科学院院士、西北工业大学常务副校长
- 董景辰 工业和信息化部智能制造专家咨询委员会委员
- 焦宗夏 “长江学者奖励计划”特聘教授



前 言

自2009年1月工业和信息化部颁发了WCDMA、cdma2000和TD-SCDMA 3张3G牌照以来，我国的移动通信正式进入了移动宽带化的3G时代。2013年12月，工业和信息化部向中国移动、中国电信、中国联通同时颁发了TD-LTE牌照，随后中国电信和中国联通又取得了LTE FDD牌照，标志着我国的移动通信正式进入4G时代。2019年6月6日，工业和信息化部向中国电信、中国移动、中国联通、中国广电发放了5G商用牌照，我国正式进入5G商用元年。

相比4G，5G网络既是演进又是变革——它虽然是4G持续演进的结果，但在技术目标和网络性能上又大大超越了4G。5G并不是简单的“4G+1G”：在无线网上，5G主要是对4G的继承和增强；而在核心网和承载网上，5G则完全是对4G的颠覆性变革。

2015年前后，5G在通信业界主要是以研究为主，作者根据当时各主要高校、科研机构、设备厂商及标准化组织的研究进展及成果，经过系统化的梳理，编写了《5G：2020后的移动通信》一书。近年来，5G日益成为通信业界最热门的主题之一，5G标准化进程在2017年巴塞罗那世界移动通信大会后开始加速。3GPP关于5G的标准制定是从R15开始的，该版本主要关注的是eMBB的标准化，其大部分功能已陆续冻结，全部功能将在2019年第三季度冻结。3GPP R16已经在2018年开始启动，该版本主要关注的是uRLLC、



mMTC 的标准化。考虑到我国 5G 牌照已经发放和 5G 标准化已经进入新阶段，作者认为现阶段需重点解决 5G 网络如何落地的问题，因此亟须在《5G：2020 后的移动通信》一书的基础上，补充 5G 关键技术最新研究进展和工程规划建设相关内容。

本书作者是中通服咨询设计研究院从事移动通信网络研究的专业技术人员，在编写过程中，融入了作者在长期从事移动通信网络规划设计工作中积累的经验和总结出的心得，可以帮助读者更好地理解 5G 系统架构、网络规划及工程建设等内容。

本书对 5G 技术的介绍总体概念突出，内容清晰，具有前瞻性和专业性，旨在普及 5G 技术标准化进展及网络规划建设中的一些关键性问题，希望能够为通信业相关人员了解 5G 关键技术、网络架构、组网方案和规划方法等内容提供有益的参考。

本书由朱晨鸣策划和主编，朱晨鸣、王强负责全书结构和内容的掌握与控制，朱晨鸣、王强、李新、彭雄根、贝斐峰、王浩宇、邢腾飞等人参与了本书内容的撰写。

书中如有任何不当之处，恳请广大读者批评指正。

作者

2019 年 7 月于南京



目 录

第 1 章 概述	001
1.1 移动通信技术发展	002
1.2 LTE 及其演进	005
1.3 5G 路线图	008
第 2 章 5G 需求与愿景	015
2.1 什么是 5G	016
2.2 5G 需求与驱动力	017
2.2.1 技术驱动	017
2.2.2 市场驱动	018
2.2.3 业务和用户需求	019
2.3 技术目标	020
2.4 5G 的应用	023
2.4.1 5G 愿景	023
2.4.2 虚拟现实	023
2.4.3 车联网与自动驾驶	024
2.4.4 物联网与智慧城市	024
2.4.5 无线医疗与远程诊断	026
2.5 5G 的挑战	027
2.5.1 性能挑战	027



2.5.2	技术储备	027
2.5.3	频谱资源	028
2.6	5G 发展路径	028
第 3 章 5G 研究项目与标准化进展		031
3.1	标准化组织与研究机构	032
3.2	5G 标准化进展	033
3.2.1	ITU-R	033
3.2.2	3GPP	034
3.2.3	NGMN	036
3.3	欧洲	037
3.3.1	METIS/METIS-II	037
3.3.2	5G PPP	039
3.4	北美	041
3.4.1	IEEE	041
3.4.2	5G Americas	041
3.5	亚太	042
3.5.1	ARIB	042
3.5.2	5GMF	043
3.6	中国	044
3.6.1	IMT-2020	044
3.6.2	CCSA	045
第 4 章 5G 传输技术		047
4.1	无线传输技术的发展	048
4.2	帧结构	049
4.2.1	关键参数	049
4.2.2	无线帧结构	051
4.3	MIMO 增强技术	054
4.3.1	Massive MIMO	054
4.3.2	网络 MIMO	064
4.4	新型多址技术	069
4.4.1	多址技术的发展	069
4.4.2	PDMA	070



4.4.3	SCMA	073
4.4.4	MUSA	074
4.5	双工技术	075
4.6	多载波技术	082
4.6.1	OFDM 改进	083
4.6.2	超奈奎斯特 (FTN) 技术	092
4.7	多 RAT 资源协调	094
4.8	调制编码技术	095
4.8.1	链路级调制编码	095
4.8.2	网络编码	098
4.8.3	链路自适应	101
第 5 章	5G 网络架构与组网技术	103
5.1	概述	104
5.2	网络架构面临的挑战	105
5.2.1	极致性能指标带来全面挑战	105
5.2.2	网络与业务融合触发全新机遇	105
5.3	新一代网络架构	106
5.3.1	5G 网络架构需求	106
5.3.2	网络架构设计	108
5.3.3	HetNet 与 C-RAN 架构	110
5.3.4	网络扁平化	116
5.3.5	网格化组网	117
5.3.6	SON	118
5.3.7	无线 Mesh 网络	119
5.3.8	按需组网	120
5.4	无线资源调度与共享	121
5.5	M2M	122
5.5.1	应用场景	122
5.5.2	关键技术	123
5.6	D2D	124
5.6.1	应用场景	124
5.6.2	关键技术	128
5.7	云网络	128



- 5.7.1 SDN 128
- 5.7.2 NFV 131
- 5.7.3 网络能力开放 134
- 5.7.4 网络切片 135
- 5.7.5 移动边缘计算 136
- 5.7.6 按需定制的移动网络 137
- 5.7.7 多接入融合 138
- 5.8 超密网络 139
- 5.9 低时延、高可靠通信 141
- 5.10 5G 网络安全 142
 - 5.10.1 5G 安全架构挑战及需求 142
 - 5.10.2 5G 安全总体目标 146
 - 5.10.3 5G 安全架构 146
 - 5.10.4 5G 安全关键技术 147
 - 5.10.5 5G 网络新的安全能力 149
- 第 6 章 5G 频谱 157**
 - 6.1 概述 158
 - 6.2 5G 频谱选择 161
 - 6.2.1 5G 频谱需求 161
 - 6.2.2 现有频谱分配 166
 - 6.3 5G 频谱分配 168
 - 6.3.1 ITU 频谱分配 168
 - 6.3.2 国外 5G 频谱分配 170
 - 6.3.3 国内 5G 频谱分配 170
 - 6.3.4 潜在可用频谱 171
 - 6.4 频谱共享 174
 - 6.4.1 授权频谱 174
 - 6.4.2 非授权频谱 175
 - 6.4.3 授权共享访问 177
 - 6.5 更高频段的使用 179
 - 6.5.1 毫米波通信 179
 - 6.5.2 可见光通信 181
 - 6.5.3 超高频信号传播 182



6.6	频谱再利用	185
6.6.1	广电频谱	186
6.6.2	雷达频谱	187
6.7	认知无线电与频谱感知	187
6.7.1	认知无线电	187
6.7.2	弱信号频谱感知	189
6.7.3	频谱优化	190
第7章	5G网络规划	193
7.1	无线网规划概述	194
7.1.1	规划目标	194
7.1.2	规划内容	195
7.1.3	规划流程	195
7.1.4	规划难点	196
7.2	无线传播模型	197
7.2.1	传播模型概述	197
7.2.2	Okumura-Hata 模型	198
7.2.3	Cost231-Hata 模型	199
7.2.4	SPM (标准传播模型)	200
7.2.5	射线跟踪模型	201
7.2.6	3D UMa 模型	202
7.3	覆盖规划	205
7.3.1	覆盖规划的特点	205
7.3.2	室外覆盖	206
7.3.3	室内覆盖	210
7.4	容量规划	214
7.4.1	容量规划的特点	214
7.4.2	5G 主要业务类型	215
7.4.3	业务需求分析	215
7.4.4	用户数估算	217
第8章	5G网络建设探讨	219
8.1	挑战与方向	220
8.2	网络建设方式	221



8.2.1 集中建设方式	221
8.2.2 共享建设方式	223
8.3 5G 工程建设要点	225
8.3.1 总体建设策略	225
8.3.2 技术要求	226
8.3.3 室外覆盖建设要点	228
8.3.4 室内覆盖建设要点	230
总结与展望	235
缩略语	237
参考文献	247